

УДК 681.515

**Г. С. РАНЧЕНКО, А. Г. БУРЯЧЕНКО, В. М. ГРУДИНКИН,
Н. Л. ГОЛУБЕВ, В. В. ДАНИЛОВ****АО «Элемент», Одесса, Украина****РЕГУЛЯТОР ДВИГАТЕЛЯ АИ-450М – РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ
И КВАЛИФИКАЦИИ НА КАТЕГОРИЮ А**

Приведены результаты работы по разработке и квалификации на категорию А регулятора двигателя цифрового РДЦ-450М для двигателя АИ-450М. Описан специально разработанный стенд-имитатор с интегрированной в его состав математической моделью двигателя, обеспечивший настройку, отладку и испытания регулятора. Приведены структуры аппаратной части регулятора и его программного обеспечения. Освещены результаты испытаний регулятора на воздействие внешних дестабилизирующих факторов и эквивалентно-циклических испытаний для подтверждения ресурса, заданного к началу квалификационных испытаний. Отражен объем испытаний, предшествовавших получению Свидетельства о годности, включая квалификационные испытания и процедуру сертификации программного обеспечения регулятора.

Ключевые слова: комплектующее изделие образца авиационной техники, закон управления, алгоритм контроля, математическая модель, сертификация программного обеспечения, измерительный канал, ресурс, эквивалентно-циклические испытания.

Введение

Регулятор двигателя цифровой РДЦ-450М (рис. 1), разработанный в АО «Элемент» по техническому заданию ГП «Ивченко–Прогресс», предназначен для реализации основного закона управления турбовальным двигателем АИ-450М (М1) – поддержание заданной частоты вращения свободной турбины посредством обеспечения потребного расхода топлива, а также для выполнения в автоматическом режиме ряда других функций управления, контроля и защиты двигателя, в том числе для защиты свободной турбины от «раскрутки» и для синхронизации мощностей двух двигателей при их совместной работе в составе силовой установки летательного аппарата.

1. Формулирование проблемы

Работы ГП «Ивченко–Прогресс» по модернизации турбовального газотурбинного двигателя АИ-450 и созданию на его базе турбовального двигателя АИ-450М (М1), начатые в 2009 году, обусловили необходимость разработки регулятора для управления новым двигателем.

К этому времени АО «Элемент» уже был разработан регулятор РДЦ-450 для двигателя АИ-450 и изготовлены опытные образцы, которые обеспечили выполнение более двухсот исследовательских программ ГП «Ивченко–Прогресс».

Теперь перед АО «Элемент» стояла задача:

– модифицировать имеющуюся разработку с

учетом особенностей двигателя;

– модернизировать конструкторские и технологические решения с учетом как результатов испытаний в составе двигателя, так и развития элементной и технологической базы;

– выполнить весь комплекс работ по квалификации регулятора в качестве комплектующего изделия авиационной техники категории А.



Рис. 1. Регулятор двигателя цифровой РДЦ-450М

2. Решение проблемы

Решение задачи по учету особенностей двигателя базировалось, разумеется, прежде всего, на техническом задании разработчика двигателя, однако формирование окончательного варианта задания потребовало совместных исследовательских испытаний, позволивших уточнить и максимально кон-

кретизировать требования по реализации функций и алгоритмов управления.

Существенную роль, начиная уже с первых этапов модернизации регулятора, сыграло наличие ранее разработанного и изготовленного в АО «Элемент» стенда-имитатора [1], который, имитируя двигатель как взаимодействующую с регулятором систему, позволил выполнять настройку, проверку и отладку регулятора в лабораторных условиях.

Основу аппаратной части стенда-имитатора составляют модули, обеспечивающие:

- имитацию всех аналоговых, дискретных и цифровых сигналов, поступающих к регулятору от датчиков, агрегатов и систем двигателя;

- прием управляющих сигналов (команд) от регулятора.

Управление взаимодействием осуществляется с помощью встроенного программного обеспечения стенда-имитатора, реализующего математическую модель двигателя.

Первоначально в программном обеспечении стенда была реализована математическая модель двигателя АИ-450, затем программное обеспечение было доработано с использованием предоставленной ГП «Ивченко–Прогресс» математической модели АИ-450М.

Взаимодействие стенда-имитатора и РДЦ-450М позволяет имитировать контроль и управле-

ние двигателем на всех заданных режимах его работы. Оператору, выполняющему испытания, предоставлена возможность управлять процессом и наблюдать результаты на экране персонального компьютера (численные значения измеряемых параметров, состояние каждого из дискретных сигналов, графики изменения параметров на режимах) с помощью специально разработанного интерфейса – программного изделия КПА-450М. Вид экрана КПА-450М приведен на рис. 2.

Следует отметить, что к началу предварительных испытаний регулятора РДЦ-450М стенд-имитатор прошел государственную аттестацию в качестве испытательного оборудования.

Дополнительно для повышения точности при исследовании метрологических характеристик измерительных каналов регулятора (выполняющих прием и преобразование сигналов двигателных датчиков давления, температуры, оборотов и др.), использован ряд имитаторов датчиков, разработанных в АО «Элемент» ранее (как, например, имитатор ДБСКТ [1]) или непосредственно при подготовке к испытаниям РДЦ-450М (как имитатор датчика вибрации). В процессе исследований сигналы имитаторов датчиков контролируются стандартизованными прецизионными средствами измерительной техники, выбранными с учетом обеспечения метрологического запаса.

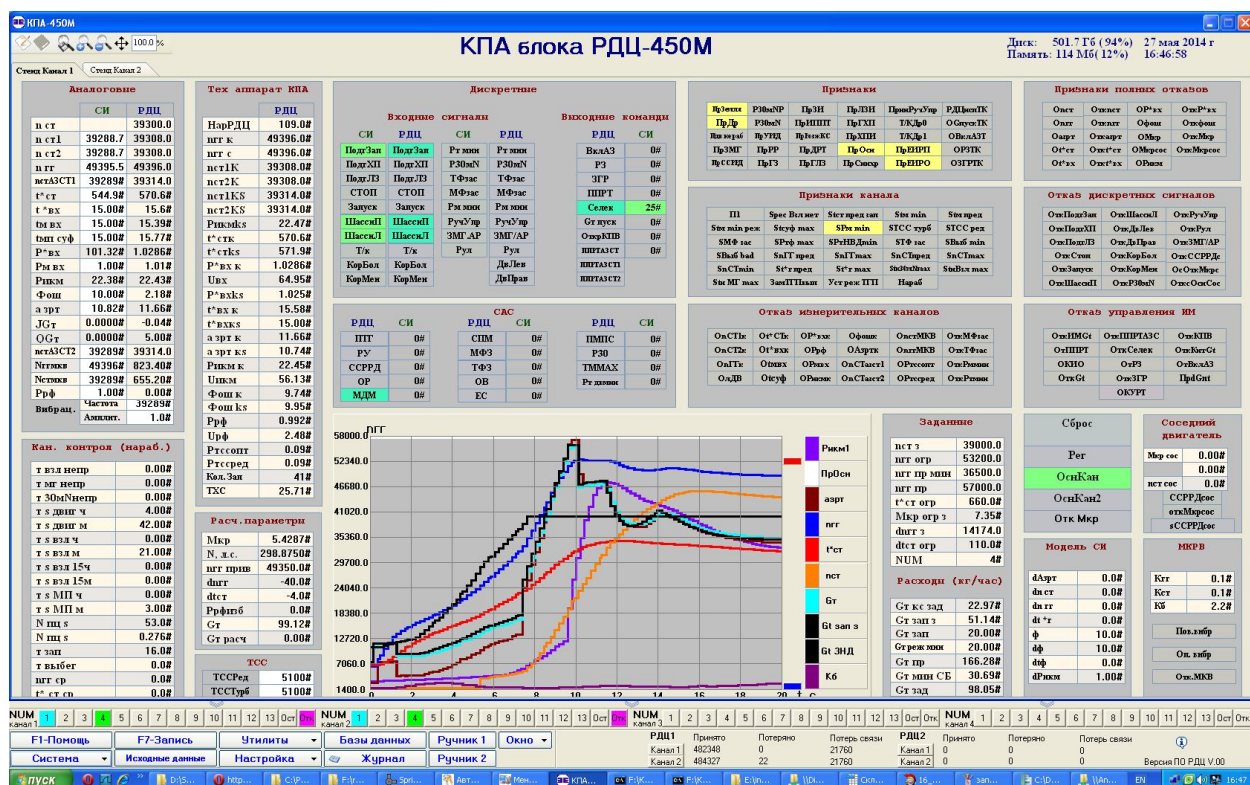


Рис. 2. Прямой экран КПА-450М

Один из измерительных каналов РДЦ-450М – канал измерения давления воздуха на входе в двигатель Рвх – имеет в своем составе встроенный датчик давления в отличие от остальных каналов, принимающих сигналы внешних по отношению к регулятору двигательных датчиков. Датчик Рвх – датчик типа АРТ-327-1000 производства фирмы Kulite (США) [2, 3] – размещен внутри корпуса РДЦ-450М и имеет выведенный на переднюю панель (рис. 1) штуцер для подвода давления. Для этого канала выполняется комплектная градуировка и проверка с использованием специализированных средств создания и измерения давления [1].

Структура регулятора РДЦ-450М показана на рис. 3. Два канала управления и контроля – основной и резервный – и два модуля автоматической защиты свободной турбины (АЗСТ) обеспечивают дублирование функций в случае выявления отказа встроенной системой контроля (переход на резервный канал), а также возможность реконфигурации структуры. Реконфигурируемая структура измерительных каналов как способ повышения надежности была использована уже в РДЦ-450 – схема, поясняющая набор вариантов, изначально доступных

для автоматической перестройки, показана в [4]. Однако для РДЦ-450М в силу ряда соображений разрешены не все эти варианты.

При модернизации РДЦ-450 были использованы новые возможности, предоставляемые быстрым обновлением элементной базы, предлагаемой на современном рынке – повышенная производительность периферийных микроконтроллеров (встроенных в модули АЦП, ДБЧ, КВ, ТСС, ДВ, ИПД – рис. 3) позволила «разгрузить» центральный процессор (модуль ЦПУ), освободив его от выполнения промежуточных вычислений, уменьшив, тем самым, вероятность возникновения сбоев.

Были проработаны новые конструкторско-технологические решения, в результате чего в РДЦ-450М реализована модульная конструкция – функциональные единицы (модули) имеют конструктивно обособленное исполнение и являются взаимозаменяемыми.

Модульная конструкция, а также предусмотренное в РДЦ-450М применение гибких соединительных плат (вместо жгутов) существенно упрощает и ускоряет технологический процесс сборки и ремонта.

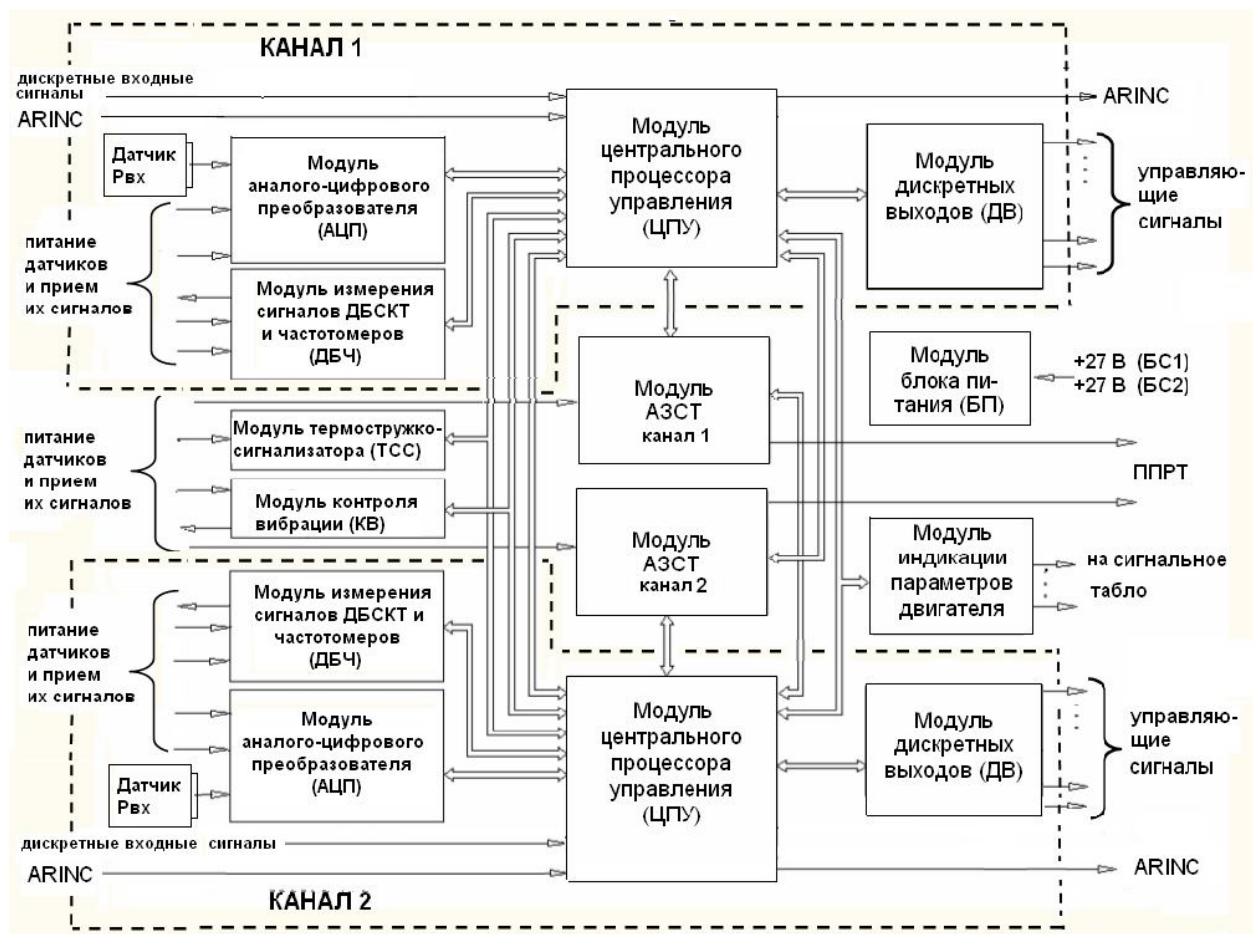


Рис. 3. Структурная схема регулятора РДЦ-450М

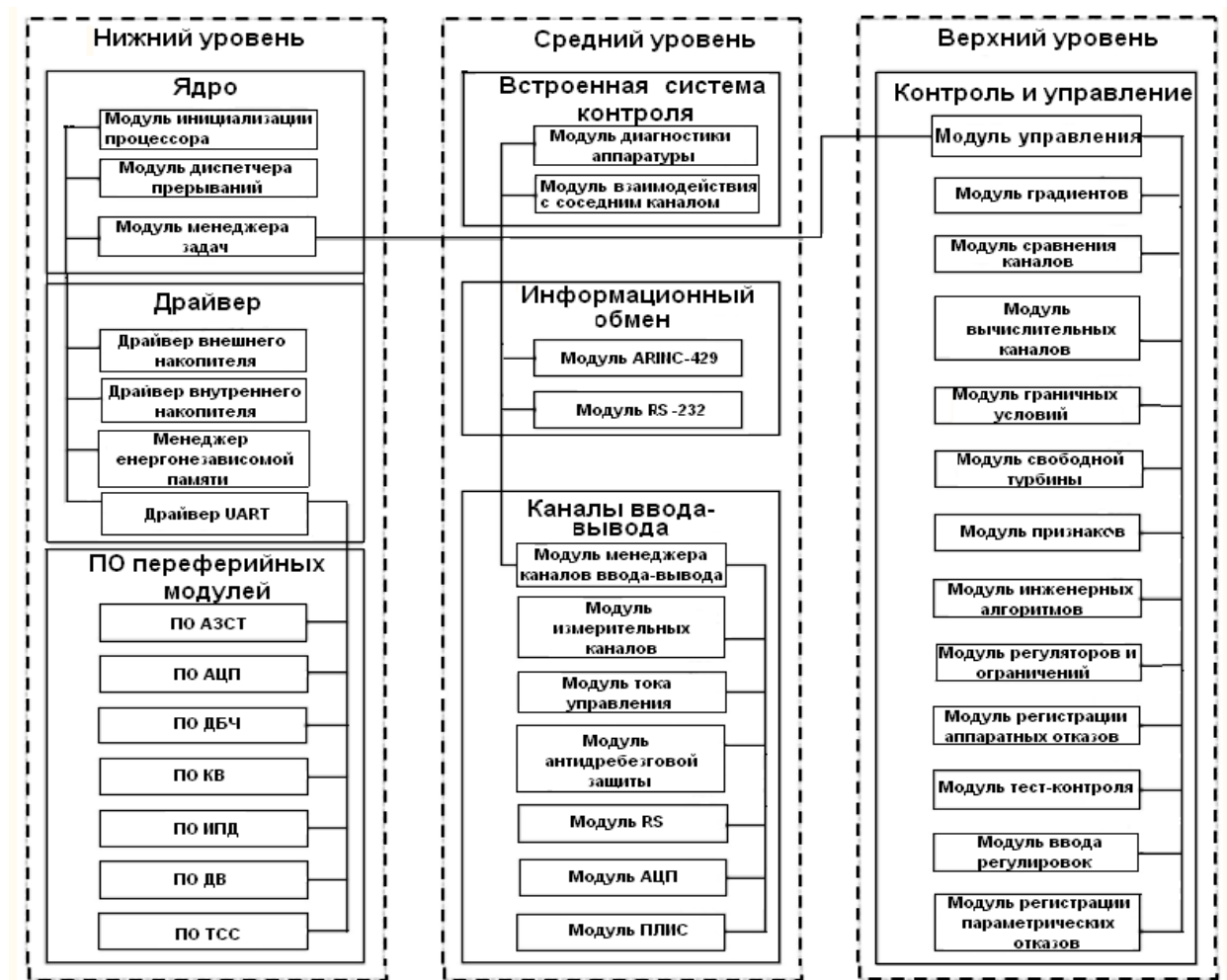


Рис. 4. Структура программного обеспечения регулятора РДЦ-450М

Структура встроенного программного обеспечения РДЦ-450М показана на рис. 4.

Программное обеспечение нижнего и среднего уровня выполняет сбор и предварительную обработку информации (сигналы от датчиков, состояние дискретных сигналов), которая затем поступает на средний и верхний уровень и используется для анализа (сравнение с заданными допусками, уставками, проверка выполнения регламентированных условий) и для последующей выработки «решений» в виде сигналов (команд), выдаваемых на исполнительные механизмы. Тем самым реализуется основной закон управления двигателем – поддержание заданной частоты вращения свободной турбины посредством обеспечения потребного расхода топлива, а также обеспечивается выполнение ряда других функций управления, контроля и защиты двигателя, важнейшими из которых являются защита свободной турбины от «раскрутки» и синхронизация мощностей двух двигателей при их совместной работе в составе силовой установки летательного аппарата.

В программном обеспечении РДЦ-450М реализован адаптивный алгоритм управления исполни-

тельным механизмом насоса-дозатора НД-450(М), который был разработан еще для РДЦ-450 [5], поскольку первоначально предусмотренный в техническом задании алгоритм (изменение амплитуды тока управления при постоянной длительности управляющего сигнала) не обеспечил требуемых характеристик. В сочетании с применением высокопроизводительного микроконтроллера в модуле ЦПУ РДЦ-450М адаптивный алгоритм позволяет без применения специальных аппаратных решений эффективно управлять расходом топлива в условиях «сухого трения».

Кроме основных функций управления и защиты двигателя, выполняемых регулятором, программное обеспечение реализует ряд вспомогательных функций. В структуре программного обеспечения предусмотрены регистратор параметров работы двигателя и регистратор отказов, обеспечивающие запись в энергонезависимой памяти характеристик режима работы и состояния САУ и двигателя. Емкость регистратора параметров составляет десять событий, регистратора отказов – двадцать событий. Также обеспечивается запись и хранение в энергонезависимой памяти:

- количества запусков;
- наработку двигателя по режимам;
- суммарной наработки двигателя;
- усредненных значений параметров работы.

Описанное выше программное изделие КПА-450М (рис. 2) предоставляет возможность обслуживающему персоналу визуализировать сохраненную в энергонезависимой памяти информацию и выполнить:

- наземный контроль технического состояния проточной части двигателя по тренду термогазодинамических параметров;
- чтение и очистку регистраторов;
- ведение архива считанных данных по дате;
- группировку считанной информации в структурированной табличной форме.

Разработка программного обеспечения проведена в строгом соответствии с квалификационными требованиями КТ-178В. Уровень критичности каждой из программ был определен, исходя из уровня критичности функций РДЦ-450М, обслуживаемых рассматриваемой программой, в результате чего для резидентной программы и загружаемой конфигурации ПЛИС центрального процессора и для резидентной программы модуля автоматической защиты свободной турбины установлен наивысший уровень критичности – А.

По результатам проработки алгоритмов управления и их реализации в аппаратно-программной структуре регулятора РДЦ-450М оформлено три патента Украины [6 - 8].

Испытания регулятора в процессе разработки и при ее завершении включали все необходимые для бортовых агрегатов этапы:

- проверка соответствия требованиям Технического задания в лабораторных условиях на испытательной базе АО «Элемент»;
- стендовые испытания в составе двигателя на ГП «Ивченко–Прогресс» с последующей доработкой Технического задания;
- предварительные и затем межведомственные испытания под контролем Независимой инспекции – на базе АО «Элемент» и специализированных испытательных лабораторий, включая НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (г. Харьков) и ИЛ ЭМС ОАО «НИИАО» (г. Жуковский, Россия);
- наземные и первый этап летно-конструкторских в составе вертолета Ми-2М;
- эквивалентно-циклические – для подтверждения назначенного ресурса, требуемого к началу квалификационных испытаний (установлен ресурс 1000 ч);
- квалификационные испытания (включая сертификацию программного обеспечения) под контролем Независимой инспекции и экспертов, назна-

ченных Авиарегистром МАК.

К настоящему времени завершен весь комплекс испытаний РДЦ-450М – предварительные, межведомственные, эквивалентно-циклические и квалификационные, включая сертификацию программного обеспечения, согласно требованиям Авиационных правил для комплектующих изделий образцов авиационной техники категории А. Авиарегистром МАК на регулятор двигателя цифровой РДЦ-450М выдано Свидетельство о годности комплектующего изделия.

Заключение

1. В результате проведенных АО «Элемент» работ по модернизации разработанных ранее опытных образцов регулятора РДЦ-450 турбовального газотурбинного двигателя АИ-450 создан регулятор РДЦ-450М турбовального двигателя АИ-450М (М1).

2. Регулятор РДЦ-450М прошел весь комплекс испытаний для комплектующего изделия авиационной техники категории А – предварительные, межведомственные, эквивалентно-циклические, квалификационные, включая сертификацию программного обеспечения – и признан годным к эксплуатации. На регулятор получено Свидетельство о годности.

3. В процессе работ по созданию регулятора РДЦ-450М был усовершенствован и прошел государственную аттестацию стенд-имитатор, имитирующий двигатель как взаимодействующую с регулятором систему, что позволяет выполнять настройку, полноценную проверку и отладку регулятора в лабораторных условиях.

4. В рамках модернизации конструкторско-технологических решений в РДЦ-450М применены модульный принцип формирования конструкции и гибкие соединительные платы, что обеспечивает минимизацию времени, необходимого для выполнения сборки или ремонта регулятора.

5. Ряд решений, заложенных в программном обеспечении регулятора РДЦ-450М, защищен тремя патентами Украины.

Литература

1. Буряченко, А. Г. Испытательная база и методическое обеспечение испытаний ответственных изделий авиационной техники [Текст] / А. Г. Буряченко, Г. С. Ранченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 4(51). – С. 75-78.
2. Буряченко, А. Г. Опыт использования датчиков давления фирмы Kulite [Текст] / А. Г. Буряченко, Н. П. Волошина, Г. С. Ранченко // *Датчики и системы*. – 2004. – № 11. – С. 38-40.
3. Буряченко, А. Г. Результаты исследования параметрической надежности авиационных датчиков давления [Текст] / А. Г. Буряченко, Г. С. Ран-

ченко, С. М. Рябоконь // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 8(105). – С. 240-245.

4. Буряченко, А. Г. Технические и алгоритмические средства повышения метрологического уровня и надежности датчиков и систем измерения давления [Текст] / А. Г. Буряченко, В. М. Грудинкин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 8(24). – С. 195-199.

5. Цифровое регулирование расхода топлива в системе с существенной нелинейностью типа «сухое трение» [Текст] / В. И. Колесников, В. А. Седристый, Г. С. Ранченко, Н. Л. Голубев, Д. И. Волков, Е. В. Павлюк // *Авиационно-космическая техника и технология* : зб. наук. праць. Двигуни та енергоустановки / Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». – Вип. 30. – Х., 2002. – С. 191-194.

6. Пат. 79857 Україна, МПК F02C 9/00. Спосіб керування дводвигуною силовою установкою гелікоптера [Текст] / Волков Д. І., Данилов В. В., Ранченко Г. С. ; заявник і патентовласник ПАТ «Елемент». – № у 201207854 ; заявл. 26.06.2012 ; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9. – 7 с.

7. Пат. 102944 Україна, МПК F02C 9/00. Спосіб керування газотурбінним двигуном [Текст] / Ранченко Г. С., Миргород В. Ф. ; заявник і патентовласник ПАТ «Елемент». – № у 201207032 ; заявл. 11.06.2012 ; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16. – 5 с.

8. Пат. 102344 Україна, МПК F02C 9/00. Спосіб керування дводвигуною силовою установкою гелікоптера [Текст] / Волков Д. І., Данилов В. В., Ранченко Г. С. ; заявник і патентовласник ПАТ «Елемент». – № а 201207855 ; заявл. 26.06.2012 ; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 7 с.

Поступила в редакцію 3.06.2014, рассмотрена в редколлегии 17.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник В. Ф. Миргород, АО «Элемент», г. Одесса.

РЕГУЛЯТОР ДВИГУНА AI-450M – РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ ТА КВАЛІФІКАЦІЇ НА КАТЕГОРІЮ А

Г. С. Ранченко, Г. Г. Буряченко, В. М. Грудінкін, М. Л. Голубев, В. В. Данилов

Наведено результати роботи по розробці та кваліфікації на категорію А регулятора двигуна цифрового РДЦ-450M для двигуна AI-450M. Описано спеціально розроблений стенд-імітатор з інтегрованою до його складу математичною моделлю двигуна, що забезпечив настройку, відладку та випробування регулятора. Наведено структури апаратної частини регулятора та його програмного забезпечення. Висвітлено результати випробувань регулятора на вплив зовнішніх дестабілізуючих факторів та еквівалентно-циклічних випробувань для підтвердження ресурсу, що заданий на початок кваліфікаційних випробувань. Відбито об'єм випробувань, що були виконані до одержання Свідоцтва про придатність, включаючи кваліфікаційні випробування та процедуру сертифікації програмного забезпечення регулятора.

Ключові слова: комплектуючий виріб зразка авіаційної техніки, закон керування, алгоритм контролю, математична модель, сертифікація програмного забезпечення, вимірювальний канал, ресурс, еквівалентно-циклічні випробування.

ENGINE AI-450M REGULATOR – RESULTS OF DEVELOPMENT AND QUALIFICATION FOR CATEGORY A

G. S. Ranchenko, A. G. Buryachenko, V. M. Grudinkin, N. L. Golubev, V. V. Danilov

The results of the engine AI-450M digital regulator RDC-450M development and qualification for A category are given. There is described the specially developed test bench with integrated engine mathematical model. This test bench gave the possibility to fulfill the tuning, the calibration and the testing of regulator. The structures of regulator hard ware and of regulator soft ware are given. There are shown the results of environmental tests and of cyclic tests which were made in order to prove the resource required for the qualification procedure beginning. There is shown the volume of tests (including the qualification tests and the regulator soft ware certification procedure) which were fulfilled before the Certificate was received.

Key words: component unit of the aircraft unit type, low of the controlling, algorithm of the controlling, mathematical model, soft ware certification procedure, measuring channel, resource, cyclic tests.

Ранченко Геннадий Степанович – Главный конструктор, АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua.

Буряченко Анна Григорьевна – Главный метролог, АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: annaodessa2007@rambler.ru.

Грудинкин Вячеслав Михайлович – зам. Главного конструктора, АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua.

Голубев Николай Леонидович – ст. науч. сотр., АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua.

Данилов Всеволод Владимирович – ведущий инженер-программист, АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua.